فصلنامه مهندسی ترافیک، سال بیست و یکم، شماره ۸۵، تابستان ۱۴۰۰، ص. ۷۷-۶۱

تعیین بهترین محل قرارگیری شناسگرهای ترافیک با هدف تخمین زمان سفر با الگوریتم ژنتیک

اکرم مظاهری، دانشجوی دکترا، گروه برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
محمود صفارزاده (مسئول مکاتبات)، استاد، گروه برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
سید صابر ناصرعلوی، استادیار، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
احمد نگراوی، دانشجوی دکترای دانشگاه شمال
E-mail: saffar_m@modares.ac.ir

چکیده

استفاده از تجهیزات شناسگرهای حلقه‌ای القایی در حرفه مهندسی ترافیک بسیار مرسوم است. ازآنجاکه اطلاعات استخراج‌شده از داده‌های برداشتی از این شناسگرها تابعی از محل این شناسگرها است، در این تحقیق روش‌شناسی تعیین محل بهینه این شناسگرها ارائه می‌شود. برای این منظور تابع هدف به‌صورت خطای تخمین زمان سفر تعریف می‌شود. این خطا اختلاف‌زمان سفر واقعی وسایل نقلیه با زمان سفری است که شناسگر (یا شناسگرها) برآورد می‌کند. بهینه‌سازی تابع هدف برای این مسئله با الگوریتم ژنتیک فرمول‌بندی شد و پس از کد نویسی در محیط نرم‌افزار متلب، با داده‌های واقعی ترافیک حل گردید. کد نویسی انجام‌شده، امکان انتخاب تعداد شناسگرهای موردنیاز در مقطع تحت مطالعه را برای کاربر فراهم می‌کند. داده‌های ترافیکی در این تحقیق از وب‌سایت NGSIM به دست آمد. کل داده‌های این تحقیق شامل ربع ساعت جریان ترافیک در بخش ۵۰۰ متری از یک آزادراه ۶ خط عبور است. نتایج به‌دست‌آمده جهت تعیین محل بهینه شناسگرهای ترافیکی، برای برخی تعداد مشخص شناسگر، حاکی از تغییرات زیاد جواب‌ها در تعیین محل بهینه شناسگرها است که این امر نشان می‌دهد برای شرایط مقطع آزادراهی تحت بررسی و داده‌های ترافیکی آن، حالات مختلفی از محل شناسگرها می‌تواند مطلوب باشد. بااین‌حال، جهت ارزیابی میزان خوبی محل شناسگرهای پیشنهادی توسط الگوریتم، برای تعدادهای مختلف شناسگر، حالت بهینه با حالت جواب یکنواخت، یعنی جوابی که بسته به تعداد شناسگر طول ناحیه ۵۰۰ متری تحت بررسی را به قسمت‌های مساوی و یکنواخت تقسیم کند، مقایسه شد و نتایج نشان داد روش پیشنهادی در تعیین محل بهینه شناسگر نسبتاً موفق است. هرچند با داده‌های این مطالعه بهبود بسیار زیادی مشاهده نشد، به نظر می‌رسد روش‌شناسی ارائه‌شده برای تعیین محل بهینه شناسگر به‌ویژه در کریدورهای طویل بسیار سودمند است.

واژه‌های کلیدی: داده‌های NGSIM، شناسگر، مکان‌یابی، سرعت وسایل نقلیه، زمان سفر

۱. مقدمه

یک ایستگاه نظارت بر ترافیک شامل مجموعه‌ای از شناسگرهای حلقه‌ای است که مسیرهای جاده‌ای را تحت پوشش قرار می‌دهند. شناسگرهای حلقه‌ای شرایط ترافیکی را در موقعیت‌های مشخصی که در آن قرار دارند، مورد نظارت قرار می‌دهند. این دستگاه‌ها اطلاعاتی را در مورد جریان ترافیک و عملکرد راه‌های جاده‌ای جمع‌آوری می‌کنند و به افراد شاغل در این بخش اجازه و امکان نظارت بر شرایط حاضر در آزادراه‌ها را می‌دهند. این دستگاه‌ها اطلاعاتی در مورد شرایط ترافیکی مانند تعداد وسایل نقلیه موجود، جریان و سرعت آن‌ها را ارائه می‌دهند. اطلاعات جمع‌آوری‌شده سپس به بخش‌های مخصوص به خود می‌روند و کاربران حاضر نیز در مواقع لازم کارهای خود را انجام خواهند داد. این اطلاعات هم‌چنین ممکن است برای ارزیابی عملکرد و یا تحلیل، ذخیره شوند. ارزیابی عملکرد آزادراه‌ها بر اساس اطلاعات به‌دست‌آمده از شناسگرهای حلقه‌ای انجام می‌شود. سرعت‌هایی که این دستگاه‌ها از آزادراه ارائه می‌دهند، برای شناسایی اتفاقات و نظارت بر شاخص‌های ترافیکی مانند تعداد، مدت و زمان سفر مفید هستند. معیارهای عملکرد محاسبه‌شده از سرعت نیز باعث بهبود عملکرد بزرگراه‌ها از طریق میزان چگالی می‌شود. این دو شاخص در نظارت بر فعالیت آزادراه‌ها کمک شایانی می‌کنند. برنامه‌های سامانه هوشمند حمل‌ونقل نیز مانند سامانه‌های جمع‌آوری اطلاعات مسافران یا شناسایی اتفاقات درون آزادراه‌ها اغلب سرعت را به‌عنوان یک پارامتر ورودی اولیه در نظر می‌گیرند. به‌طورکلی، سرعت‌های ثبت‌شده توسط شناسگرهای حلقه‌ای جهت بهره‌وری و کارآمدی و تأثیرگذاری هر چه بیش‌تر سامانه‌های مدیریت حمل‌ونقل آزادراهی، بسیار حیاتی هستند.

بهینه‌سازی فواصل شناسگرها به‌صورت یک مدل بهینه‌سازی تحت محدودیت‌های خاصی است که در کاربردهای مختلف، متفاوت‌اند. برخی از این کاربردها شامل شناسایی جریان ترافیک، تخمین زمان سفر و یا شناسایی شرایط جاده است. جهت شناسایی دقیق فواصل بهینه شناسگرها شاید بتوان مدل جامعی ارائه کرد که تمامی عوامل مؤثر شناسگر همچون انواع مختلف شناسگر (شناسگر حلقه‌ای، مغناطیسی و غیره)، هزینه، مکان شناسگر (جاده یا تقاطع) و عوامل جاده همچون بودجه لازم جهت تجهیز کردن جاده به شناسگر و مکان‌های خاص جاده، درجات مختلف جاده (جاده سریع، تند راه، جاده اصلی شهری، جاده لغزنده) و مواردی از این قبیل در نظر بگیرد، ولی در این تحقیق یک حالت بسیار ساده، یعنی برآورد دقیق سرعت سفر توسط شناسگر، مدنظر قرار می‌گیرد.

یکی از اساسی‌ترین داده‌ها در مدیریت حمل‌ونقل، آمار تردد وسایل نقلیه است که شناسگرها جهت برداشت این داده‌ها به کار می‌روند. داده‌های شناسگرها جهت تشخیص حادثه، کنترل شیب‌راهه، برداشت داده‌های طراحی شبکه و اطلاعات موردنیاز در مسائل مکان‌یابی تجهیزات هوشمند کنترلی استفاده می‌شوند. اهداف مذکور تا حد زیادی وابسته به مکان دقیق شناسگرها بوده، لذا مکان‌یابی بهینه این تجهیزات از اهمیت زیادی برخوردار است.

۲. روش پژوهش

هدف تعیین مکان شناسگر در طول مسیر آزادراه است به‌گونه‌ای است که زمان سفر پیش‌بینی‌شده توسط شناسگر کم‌ترین خطا را داشته باشد. زمان سفر واقعی خودروها از داده‌های خط سیر واقعی خودروها به دست می‌آید. برای تخمین زمان سفر وسایل نقلیه با استفاده شناسگر، ابتدا برای بازه زمانی تحلیل، متوسط سرعت وسایل نقلیه را به دست می‌آوریم و سپس با در اختیار داشتن طول ناحیه تحت پوشش شناسگر و سرعت (با فرض حرکت با سرعت ثابت وسایل نقلیه در طول ناحیه پوشش شناسگر) می‌توان تخمینی از زمان سفر وسایل نقلیه ارائه کرد.

ابتدا تعداد شناسگرها توسط کاربر تعیین می‌گردد. کد نویسی انجام‌شده برای هر تعداد شناسگر از پیش تعیین‌شده بهترین

محل شناسگرها را مشخص می‌کنند. این محل شناسگر به‌گونه‌ای تعیین می‌شود که خطای ناشی از تخمین زمان سفر را به حداقل برساند ازیک‌طرف زمان سفر واقعی خودروها از داده‌های خط سیر خودروها به دست می‌آید. برای این کار لازم است طول ناحیه تحت پوشش هر شناسگر مشخص شود.

منظور از ناحیه پوشش طولی از آزادراه است که حرکت خودروها با سرعت ثابت در آن فرض می‌شود که همان سرعتی است که شناسگرها آن را برداشت کرده‌اند. به‌عبارت‌دیگر سرعتی که خودروها از روی شناسگر عبور می‌کنند، فرض می‌شود در طول ناحیه پوشش ثابت است. جهت تعیین ناحیه پوشش شناسگر ممکن است روش‌شناسی است که تعداد و محل شناسگر معلوم شود اگر شناسگر در یک سمت اولین شناسگر موجود در ناحیه تحت بررسی باشد از همان سرعت از همان سمت بخشی از ناحیه پوشش آن شناسگر در نظر گرفته می‌شود. به‌این‌علت که بهترین تصمیم سرعتی که می‌توان به آن بخش نسبت داد سرعتی است که نزدیک‌ترین شناسگر سرعت را برداشت کرده است. شناسگرها هرگاه در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند آنگاه وسط دو شناسگر مرز بین ناحیه پوشش شناسگرها است.

موارد معرفی‌شده در خصوص تعیین طول ناحیه پوشش برای یک شناسگر را می‌توان به‌گونه‌ای دیگر توضیح داد که شاید راحت‌تر قابل‌فهم باشد در کنار هر سمت شناسگر در راه دو حالت می‌تواند وجود داشته باشد: شناسگر دیگر وجود دارد و یا شناسگری وجود ندارد. فاصله بینابینی دو شناسگر مرز بین ناحیه پوشش آن‌ها محسوب می‌شود. در حالت دوم یعنی در حالتی که یک سمت شناسگر ابتدا یا انتهای راه تحت بررسی در سر اثر آزاد ناحیه تحت بررسی شناسگر ناحیه پوشش محسوب می‌شود. بدین ترتیب ناحیه پوشش شناسگر مشخص می‌گردد در طول راه تحت بررسی یک یا چند شناسگر بسته به نظر تصمیم‌گیرنده تعداد شناسگرهای مخصوص در نظر گرفته می‌شود وجود دارد. چند ناحیه پوشش مشخص تقسیم می‌شود و ناحیه شناسگر به هر ناحیه پوشش، سرعت وسایل نقلیه ثابت فرض می‌شود. سرعت برای هر وسیله نقلیه‌ای که از هر شناسگر سرعت آن را اندازه‌گیری می‌شود، در طول ناحیه شناسایی تحت پوشش ثابت در نظر گرفته می‌شود؛ البته می‌توان سرعت وسایل را متوسط سرعت وسایل نقلیه‌ای که در یک بازه زمانی از روی شناسگر موردنظر عبور کردند، در نظر گرفت ولی به علت دقت بیش‌تر این هم فزونی صورت نگرفت.

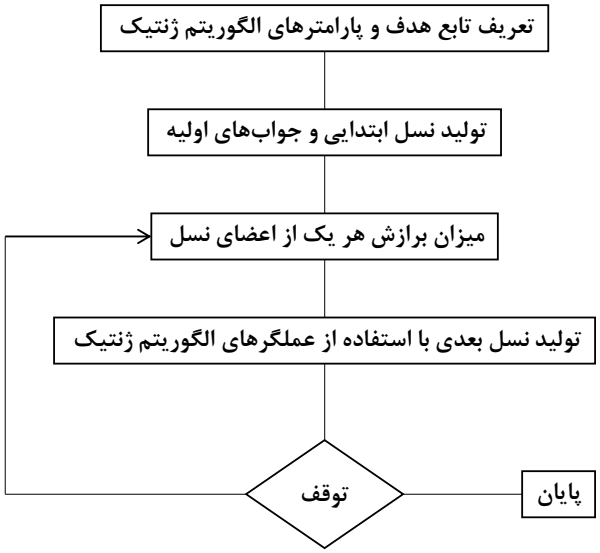
حال برای سهم پوشش با توجه به اینکه سرعت حرکت و طول ناحیه پوشش مشخصات می‌توان از زمان سفر را برای آن قسمت با فرض حرکت با سرعت ثابت و استفاده از معادلات حرکت با سرعت ثابت به دست آورد با در اختیار داشتن زمان سفر در بخش‌های مختلف راه می‌توان به زمان سفر در طول ناحیه تحت بررسی را به دست آورد.

برای حل مسئله تعیین مکان بهینه شناسگر از الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود. الگوریتم ژنتیک به‌عنوان شاخه‌ای از محاسبات تکاملی و معروف‌ترین و کاربردی‌ترین آن‌ها شناخته می‌شود. به‌طورکلی محاسبات تکاملی بر مبنای به‌کارگیری اصول و مراحل تکامل طبیعی پایه‌ریزی شده‌اند و مسائل ریاضی را با استفاده از اصول مطرح در تکامل طبیعی حل می‌نمایند. الگوریتم ژنتیک، مشهورترین روش جستجوی تکاملی است. یکی از خواص الگوریتم‌های ژنتیک، این است که حتی اگر این الگوریتم‌ها را بد پیاده کنند، بازهم جواب‌های قابل‌قبولی را به دست می‌آورند. امروزه، الگوریتم‌های ژنتیک به دلیل قابلیت اعمال بر روی طیف وسیعی از مسائل و مقاوم بودن، شهرت زیادی کسب کرده‌اند. برای استفاده از این الگوریتم لازم است به‌طور تصادفی از فضای جستجو به تعداد نسل اول جواب امکان‌پذیر تولید شود. سپس الگوریتم با انجام یک سری عملگرها و تولید نسل‌های جدید درنهایت بهترین جواب امکان‌پذیر را به‌عنوان جواب بهینه معرفی می‌کند. لازم به ذکر است مه این جواب بهینه لزوماً بهینه جهانی نیست ولی ثابت

شده است در الگوریتم ژنتیک می‌تواند به اندازه کافی به جواب بهینه جهانی نزدیک شود.

برای تولید یک جواب شدنی یا امکان‌پذیر، کاربر تعداد شناسگرها را مشخص می‌کند. به تعداد شناسگرها عدد تصادفی بین مقدار صفر تا طول جاده برحسب متر در اینجا ۵۰۰ متر تا دو رقم اعشار که با دقت سانتی‌متر باشد تولید می‌شود. هر عدد تصادفی نمایانگر تعیین محل شناسگر است. بهترین ترتیب یک جواب امکان‌پذیر به وجود می‌آید تقریب زمان سفر با استفاده از جواب امکان‌پذیر زمان سفر واقعی خودروها با استفاده از داده‌های خط سیر تعیین می‌شود.

شکل ۱ فلوچارت بهینه‌سازی مکان شناسگر با استفاده از الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد. برای محقق شدن اهداف این تحقیق ابتدا تابع هدف و پارامترهای الگوریتم ژنتیک تعریف می‌شود. سپس نسل ابتدایی و جواب‌های اولیه تولید می‌گردد. برای هر یک از اعضای نسل میزان خوبی یا برازش تعیین می‌گردد. با استفاده از عملگرهای الگوریتم ژنتیک نسل بعدی تولید می‌شود و این کار به‌صورت تکرارهای معلوم ادامه می‌یابد و بهترین جواب از آخرین نسل به‌عنوان جواب مسئله معرفی می‌شود.

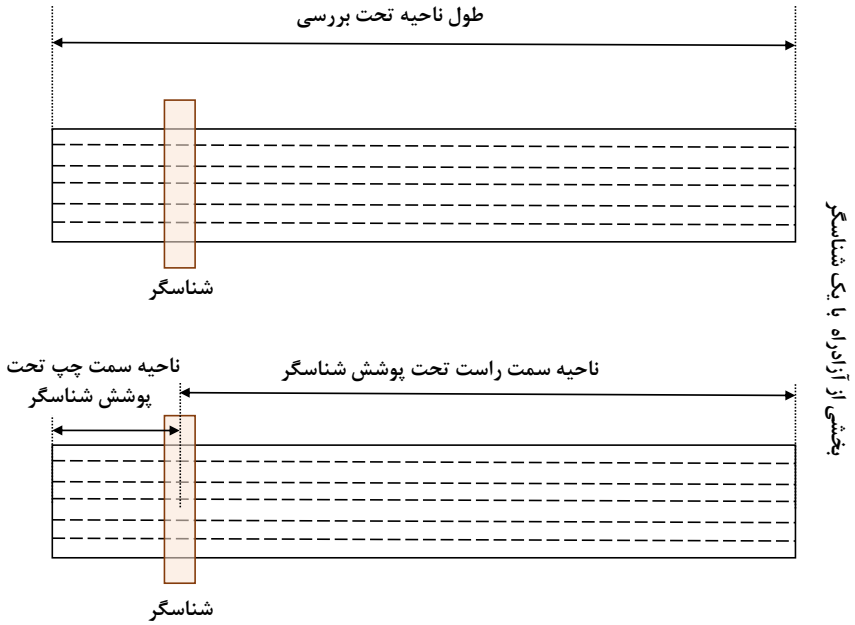


شکل ۱. فلوچارت بهینه‌سازی مکان شناسگر با استفاده از الگوریتم ژنتیک

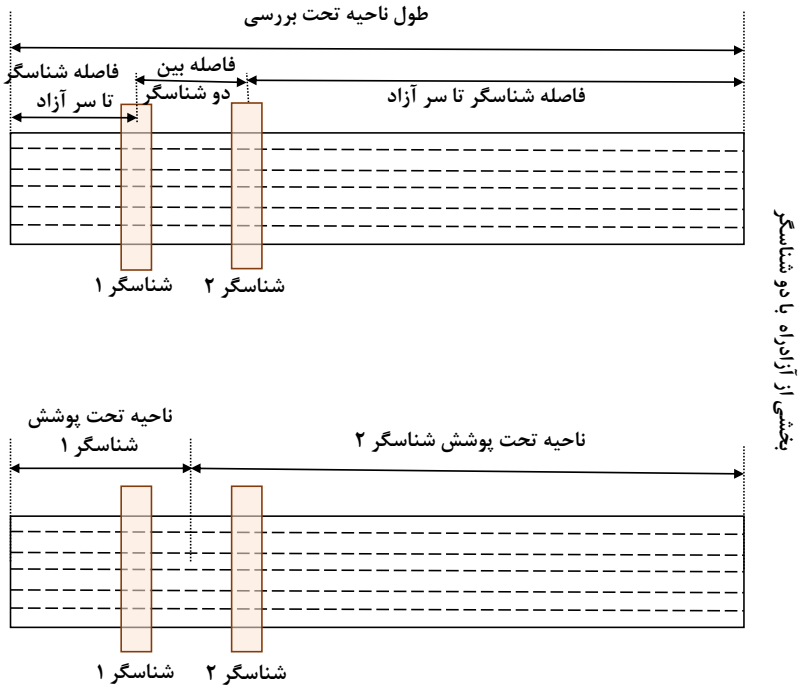
۲-۱ تعاریف

همان‌طور که ذکر شد، منظور از ناحیه پوشش یک شناسگر، طولی از آزادراه است که در آن خودروها با حرکت سرعت ثابت فرض می‌شود که این سرعت، همان سرعتی است که شناسگرها آن را ثبت و ضبط کرده‌اند. در این قسمت مفهوم طول ناحیه تحت پوشش به‌صورت شکل توضیح داده می‌شود.

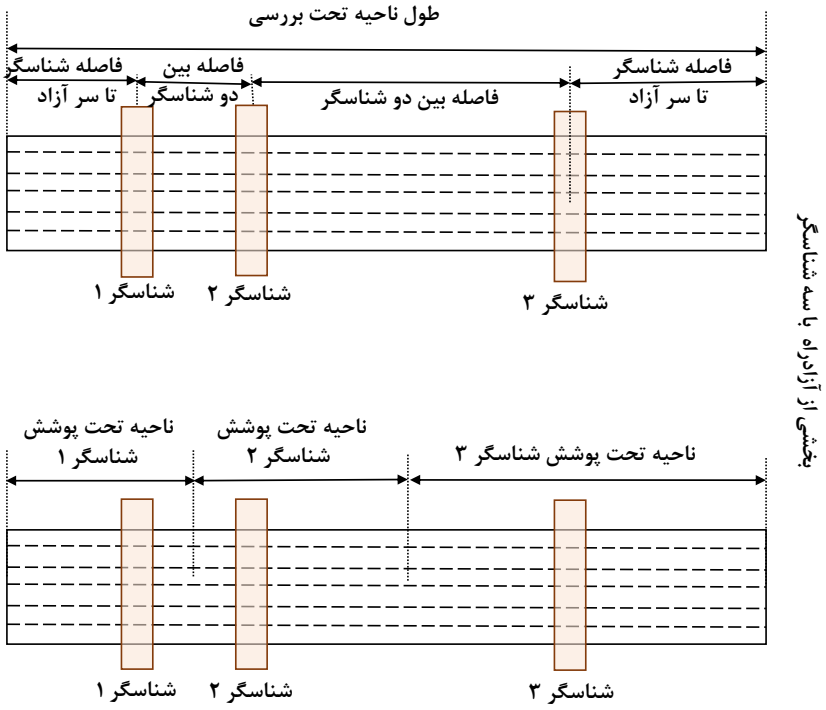
در شکل‌های ۲ تا ٤ که با الگوی مشابه ترسیم شده است، می‌توان طول ناحیه تحت پوشش توسط یک شناسگر را برای آزادراه مشاهده کرد. این شکل‌ها مفهوم ناحیه تحت پوشش را به ترتیب برای یک، دو و سه شناسگر در بخش تحت بررسی یک آزادراه، نشان می‌دهد. در هرکدام از این شکل‌ها دو تصویر مشخص است. تصویر بالا محل شناسگر یا شناسگرها را در آزادراه نشان می‌دهد و تصویر پایین ناحیه تحت پوشش هر شناسگر را تعیین می‌کند. برای سایر حالات بیش از سه شناسگر هم می‌توان از الگوی مشابه استفاده کرد.



شکل ۲. تعریف نواحی تحت پوشش شناسگر برای حالت یک شناسگر



شکل ۳. تعریف نواحی تحت پوشش شناسگر برای حالت دو شناسگر



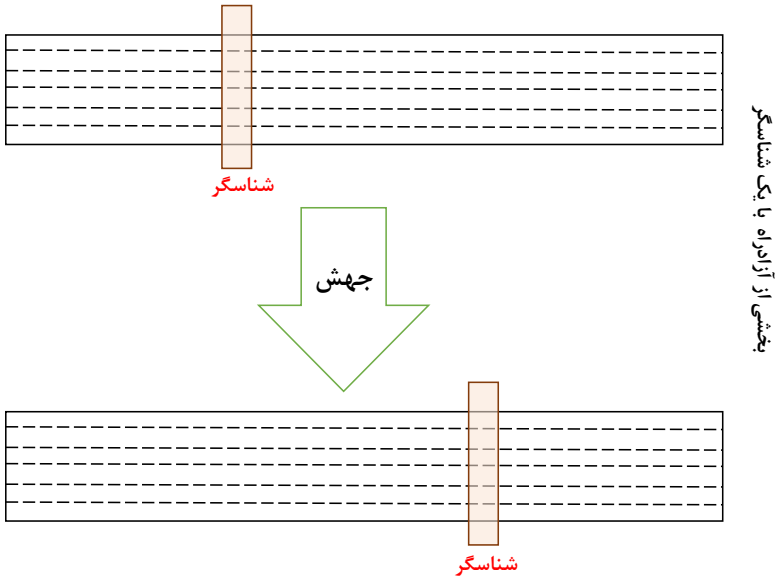
شکل ٤. تعریف نواحی تحت پوشش شناسگر برای حالت سه شناسگر

۲-۲ تعریف عملگر جهش

عملگر جهش می‌تواند از الگوریتم ژنتیک حذف گردد اما وجود آن با یک احتمال ضعیف سرعت هم‌گرایی سامانه را افزایش می‌دهد. درواقع عملگر جهش مکانیسمی است که در اثر آن یک تغییر غیر سازمان‌یافته و کاملاً تصادفی به یک جواب داده می‌شود. نتیجه این تغییر می‌تواند موجب بهتر شدن ماهیت جواب شود. باید توجه داشت که اندازه واریانس تغییرات نباید زیاد باشد چون در این صورت احتمال خراب شدن عملکرد رشته زیادتر می‌شود. علت وجودی این عملگر در این است که معمولاً در اثر عمل ترکیب متقابل ماهیت رشته‌های مجموعه و درنتیجه عملکرد آن‌ها ممکن است به‌جای میل کردن به سمت بهترین عملکرد مطلق، به سمت یک عملکرد بهتر نسبی میل کند و یا به عبارت دقیق‌تر ممکن است تابع به‌جای بهینه مطلق به‌سوی بهینه نسبی میل کند. در اثر عمل جهش احتمال رسیدن به بهینه مطلق افزایش می‌یابد. ولی باید توجه داشت که افزایش درصد جهش (از طریق افزایش واریانس تغییرات) باعث کندتر شدن فرایند هم‌گرایی الگوریتم می‌شود. البته امکان جهش مثبت بسیار خوب هم وجود دارد و در صورت بروز، به‌سرعت توسط عملگر انتخاب طبیعی جذب خواهد شد ولی جهش‌های منفی توسط این عملگر، رد خواهند شد.

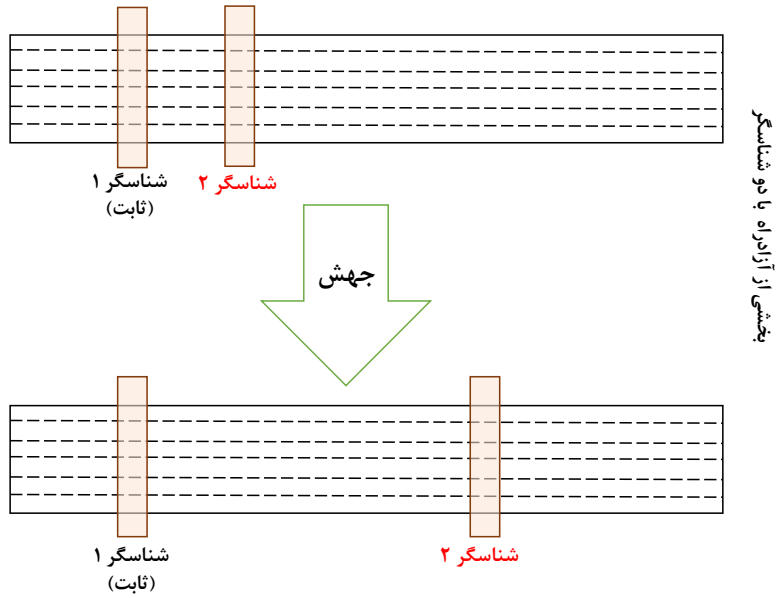
در شکل‌های ۵ تا ۷ که با الگوی مشابه ترسیم شده است، می‌توان تعریف عملگر جهش را به ترتیب برای جواب‌های با یک شناسگر، دو شناسگر و سه شناسگر در بخش تحت بررسی آزادراه مشاهده کرد. در هرکدام از این شکل‌ها دو تصویر مشخص است. تصویر بالا محل شناسگر یا شناسگرها را پیش از به‌کارگیری عملگر جهش نشان می‌دهد و تصویر پایین محل شناسگر یا شناسگرها را پس از به‌کارگیری عملگر جهش نشان می‌دهد. برای سایر حالات بیش از سه شناسگر هم می‌توان از الگوی مشابه استفاده کرد.

لازم به توضیح است در حالت تنها یک شناسگر، عملگر جهش به‌جای محل شناسگر قبلی، یک محل جدید را به‌طور تصادفی مشخص می‌کند.

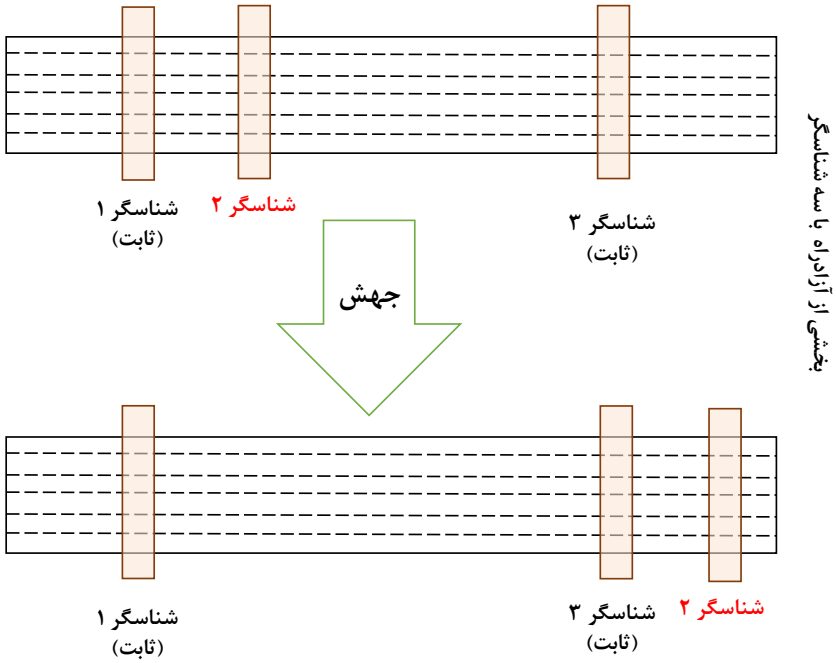


شکل ۵. تعریف عملگر جهش برای حالت یک شناسگر

در حالتی که دو شناسگر یا بیشتر در بخش تحت بررسی وجود دارد، روال کار عملگر جهش همان‌طور که در شکل‌های ٦ و ٧ مشخص است، به‌این‌ترتیب است که ابتدا به‌صورت تصادفی یکی از شناسگرها انتخاب می‌شود. شناسگر تعیین‌شده همان شناسگری خواهد بود باید با عمل جهش ایجاد تغییر نماید و به‌عبارت‌دیگر با جابجایی تصادفی، محل آن تغییر کند. سپس با ثابت نگه‌داشتن سایر شناسگرها، یک محل جدید به‌صورت تصادفی برای شناسگر انتخاب‌شده تعیین می‌گردد.



شکل ٦. تعریف عملگر جهش برای حالت دو شناسگر



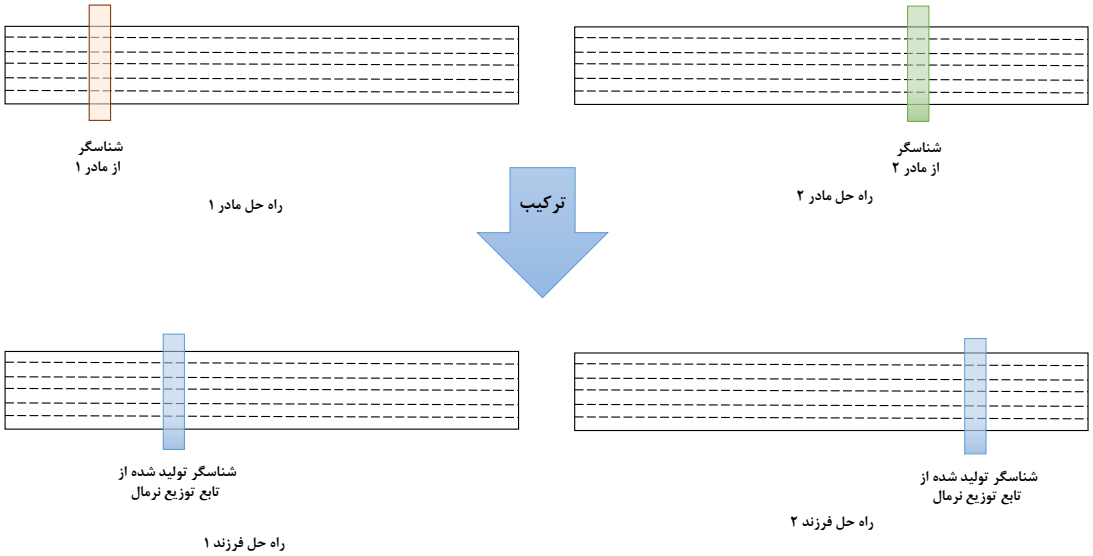
شکل ۷. تعریف عملگر جهش برای حالت سه شناسگر

۲-۳ تعریف عملگر ترکیب متقابل

عملگر ترکیب متقابل باعث تبادل اطلاعات مابین رشته‌ها یا جواب‌ها می‌گردد و در اثر این عملگر رشته‌های جدید به وجود می‌آید. در شکل‌های ۸ تا ۱۰ که با الگوی مشابه ترسیم شده است، می‌توان تعریف عملگر ترکیب متقابل را به ترتیب برای جواب‌های با یک شناسگر، دو شناسگر و سه شناسگر در بخش تحت بررسی آزادراه مشاهده کرد. در هرکدام از این شکل‌ها دو تصویر مشخص است. تصویر بالا محل شناسگر یا شناسگرها را پیش از به‌کارگیری عملگر ترکیب متقابل نشان می‌دهد و تصویر پایین محل شناسگر یا شناسگرها را پس از به‌کارگیری عملگر ترکیب متقابل نشان می‌دهد. برای سایر حالات بیش از سه شناسگر هم می‌توان از الگوی مشابه استفاده کرد.

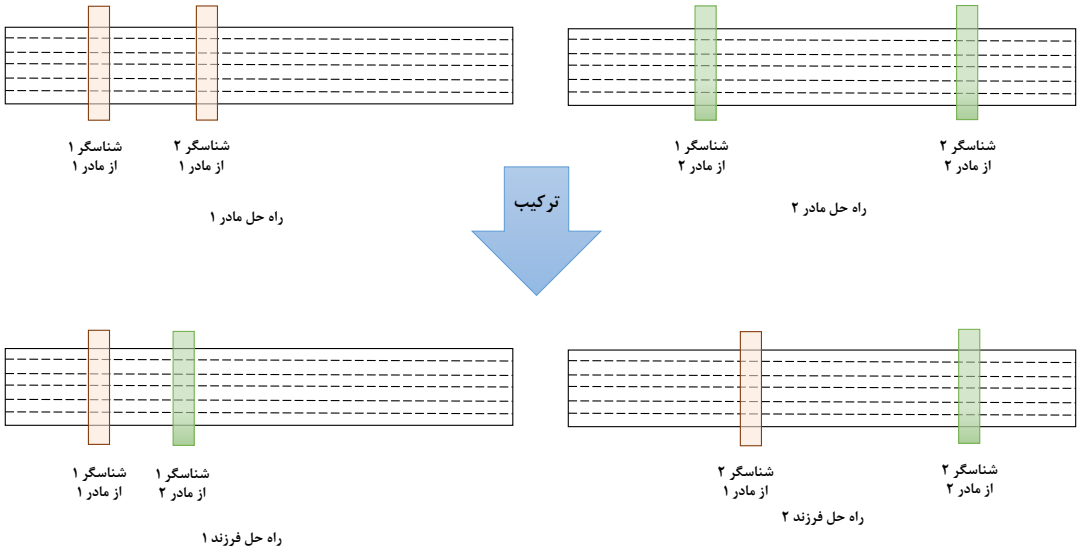
لازم به توضیح است عملگر ترکیب متقابل در هر مرحله از دو جواب مشخص در هر نسل، دو جواب جدید برای نسل بعد ایجاد می‌کند و به‌گونه‌ای این کار باید صورت گیرد که از جواب‌های فرزند (نسل بعد) نشانی از جواب‌های مادر (نسل حاضر) در آن وجود داشته باشد.

در حالت تنها یک شناسگر، عملگر ترکیب متقابل به‌جای محل شناسگر قبلی برای هر جواب، از تابع توزیع نرمال با انتخاب میانگین محل قبلی شناسگر و انتخاب واریانس مناسب نسبتاً کوچک، یک محل جدید را به‌طور تصادفی مشخص می‌کند. لازم به ذکر است در حالتی که یک شناسگر در آزادراه وجود دارد، مفاهیم عملگرهای ترکیب متقابل و جهش بسیار شبیه به هم هستند.



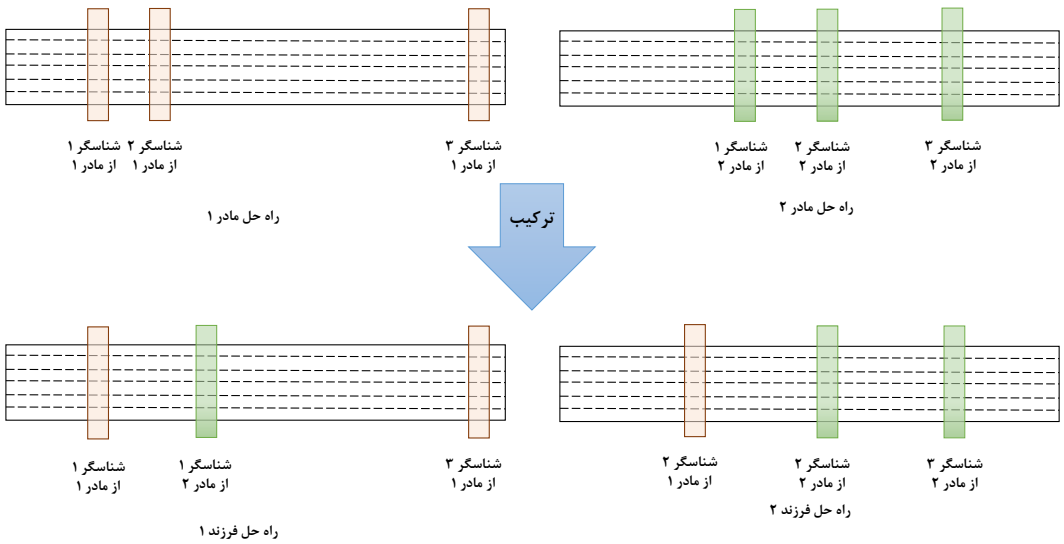
شکل ۸. تعریف عملگر ترکیب متقابل برای حالت یک شناسگر

در حالتی که دو شناسگر یا بیشتر در بخش تحت بررسی وجود دارد، روال کار عملگر ترکیب متقابل همان‌طور که در شکل‌های ۹ و ۱۰ مشخص است، به‌این‌ترتیب است که ابتدا به‌صورت تصادفی یک یا چند شناسگر از هر جواب مادر انتخاب می‌شود. محل این شناسگرهای انتخاب‌شده برای جواب‌های فرزند ثابت در نظر گرفته خواهند شد. سپس، شناسگرهای انتخاب‌نشده جواب‌های مادر، در دو جواب مادر جابه‌جا می‌شوند تا جواب‌های فرزند جدیدی ایجاد شود.



شکل ۹. تعریف عملگر ترکیب متقابل برای حالت دو شناسگر

برای توضیح بیشتر، به شکل ۱۰ برای حالتی که سه شناسگر در بخش تحت بررسی آزادراه وجود دارد توجه بفرمایید. از راه‌حل مادر ۱ شناسگر ۲ و از راه‌حل مادر ۲ شناسگر ۱ به‌طور تصادفی انتخاب شده است. سپس، با ثابت نگه‌داشتن محل سایر شناسگرها و جابه‌جایی محل دو شناسگر انتخاب‌شده با یکدیگر، دو جواب جدید ایجاد شده است.



شکل ۱۰. تعریف عملگر ترکیب متقابل برای حالت سه شناسگر

۲-٤ داده‌های پژوهش

داده‌های ترافیکی به‌کاررفته در این تحقیق از وب‌گاه اینترنتی شبیه‌سازی نسل آینده (NGSIM[1]) به دست آمد. این داده‌ها با حمایت مالی اداره راه ایالات‌متحده (FHWA)[2] و جهت توسعه الگوریتم‌های رفتاری در شبیه‌سازی خرد ایجاد شده است. مجموعه این داده‌های بسیار دقیق و با جزئیات جمع‌آوری‌شده از سال ۲۰۰۵ میلادی به بعد، قابل‌دسترس همه محققین علاقه‌مند (قابل دانلود رایگان) و برای بازبینی و اعتبار-سنجی مدل‌های ترافیکی ده‌ها مقاله به‌کاررفته است. این داده‌ها شامل چهار مجموعه داده‌ای از آزادراه‌ها و شریانی‌ها شامل: آزادراه I-80 در Emeryville، کالیفرنیا (۳ تا ربع ساعت)، آزادراه US-101 در لوس‌آنجلس، کالیفرنیا (۳ تا ربع ساعت)، شریانی بلوار Lankershim در لوس‌آنجلس، کالیفرنیا (۲ تا ربع ساعت) و شریانی خیابان Peachtree در آتلانتا، جورجیا (۲ تا ربع ساعت) است.

ضبط موقعیت خودروها در این داده‌ها در هر یک‌دهم ثانیه با استفاده از دوربین‌های با دقت بالا صورت گرفته است. داده‌های NGSIM مورداستفاده در این مقاله، شامل داده‌های خرد جریان ترافیک قسمتی از آزادراه ٦ خط عبور I-80 در Emeryville، ایالت کالیفرنیا به طول ۵۰۰ متر انجام می‌گیرد. داده‌های ترافیکی مربوط به ربع ساعت جریان ترافیک (از ساعت ٤:۰۰ تا ٤:۱۵ بعدازظهر) و در سال ۲۰۰۵ جمع‌آوری شده است. این داده‌ها شامل خط سیر عبور ۲۰۵۲ خودرو و دارای حدود یک‌میلیون و سیصد هزار رکورد که هر رکورد حاوی اطلاعات وضعیت حرکتی یک خودرو در یک لحظه مشخص است.

۳. تحلیل داده‌ها

اطلاعات خط سیرهای خودروها در NGSIM با فرمت text ذخیره شده است و برای جاده بین ایالتی Interstate-80 یک فایل text برای هر مدت‌زمان ۱۵ دقیقه‌ای؛ یعنی در کل سه فایل برای سه ۱۵ دقیقه ٤ تا ٤: ۱۵ بعدازظهر، ۵ تا ۵:۱۵ و ۵:۱۵ تا ۵:۳۰ بعدازظهر موجود است. هرکدام از فایل‌های text دارای ۱۸ ستون و تعداد بسیار زیادی سطر است (مثلاً برای ۱۵ دقیقه ٤ تا ٤:۱۵ بعدازظهر بالغبر ۱۲٦۰۰۰۰ سطر وجود دارد). اطلاعات هر سطر مربوط به یک خودروی مشخص در یک زمان مشخص است. معرفی ۱۸ ستون اطلاعاتی هر یک از این فایل‌ها در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. اطلاعات اولیه خط سیر خودروها در NGSIM

شماره ستون	نام ستون	واحد	شماره ستون	نام ستون	واحد
۱	Vehicle ID	Number	۱۰	Vehicle Width	Feet
۲	Frame ID	1/10 of a second	۱۱	Vehicle Class	Text
۳	Total Frames	1/10 of a second	۱۲	Vehicle Velocity	Feet/Second
٤	Global Time (Epoch (Time	Milliseconds	۱۳	Vehicle Acceleration	Feet/Second Square
٥	Local X	Feet	١٤	Lane Identification	Number
٦	Local Y	Feet	١٥	Preceding Vehicle	Number
٧	Global X	Feet	١٦	Following Vehicle	Number
٨	Global Y	Feet	١٧	Spacing	Feet
٩	Vehicle Length	Feet	١٨	Headway	Seconds

اجرای الگوریتم ژنتیک برای حل یک مسئله شامل پنج مرحله به شرح زیر است:

۱. ارائه شکل جواب مسئله به‌نحوی‌که برای الگوریتم ژنتیک مناسب باشد.

۲. تعیین روش تولید جمعیت اولیه که دربرگیرنده جواب‌های بالقوه مفید باشد.

۳. تعیین تابع (توابع) برآورد نیکویی[۳] جواب‌ها.

٤. تعیین عملگرهای ژنتیکی مانند تولیدمثل، جهش و معکوس که ترکیبات فرزندان را در خلال تولید مجدد تحت تأثیر قرار می‌دهد.

۵. تعیین پارامترهای الگوریتم ژنتیک مانند اندازه جمعیت، تعداد نسل‌ها، نرخ تولیدمثل[٤] و احتمال جهش[٥]

در قالب استاندارد الگوریتم ژنتیک، کروموزوم‌ها (جواب‌ها) به‌صورت رشته‌های دودویی می‌باشند؛ اما استفاده از این شکل برای بسیاری از مسائل عملی منجر به پیچیده شدن جواب‌ها می‌شود و در بسیاری موارد ارائه جوابی به این شکل ناممکن است. ازاین‌رو در کاربردهای الگوریتم ژنتیک برای مسائل بهینه‌سازی به‌جای کار کردن با رشته‌های دودویی پیچیده از شکل جواب متناسب با مسئله موردنظر استفاده می‌شود.

اساس ساختار الگوریتم ژنتیک، مکانیزم کدگذاری است که برای بیان متغیرهای مسئله بهینه‌سازی استفاده می‌شود. مکانیزم کدگذاری، هر جواب مسئله را به یک رشته از اعداد مرتبط می‌سازد. هنگامی‌که متغیرهای کد شده در کنار هم قرار می‌گیرند، رشته کروموزوم را به وجود می‌آورند.

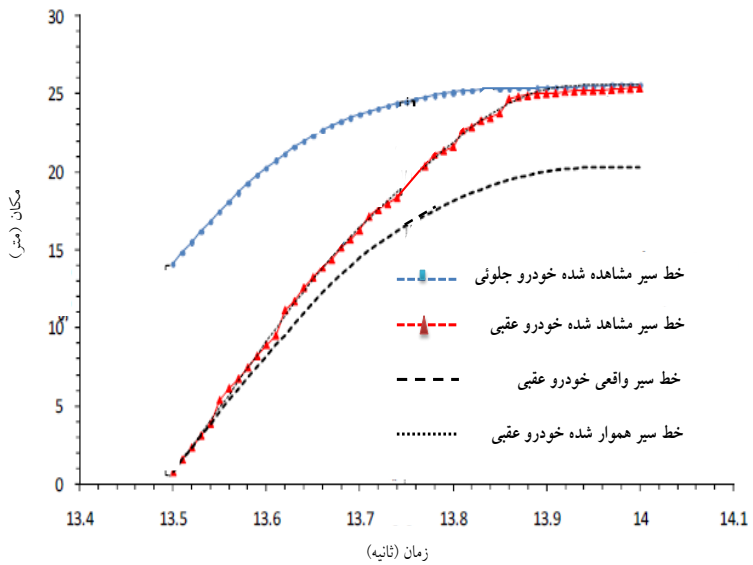
داده‌های این تحقیق از سایت NGSIM به دست آمد. در این قسمت ابتدا کمی در خصوص پروژه NGSIM توضیح داده می‌شود و سپس به‌منظور شناخت بهتر داده‌های تحقیق، تحلیل اولیه‌ای در خصوص آمار توصیفی و بررسی چگونگی توزیع متغیرهای مختلف خط سیر خودروها، صورت می‌گیرد.

خطاهای موجود در داده‌های خط سیر خودروها بر ۲ نوع هستند، خطای تصادفی و سیستماتیک. الف) مکان پیموده شده توسط یک خودرو در ۲ بازه زمانی ۰/۱ ثانیه پشت سر هم که طول ۲ قطعه پشت سر هم در منحنی خطی تکه‌ای است می‌تواند بشدت متفاوت باشد. این مسئله به‌صورت یک نویز (خطای تصادفی) در تابع خط سیر خودروها دیده می‌شود و در توابع سرعت و شتاب با توجه به عملیات تفریق و تقسیم موجود بیشتر می‌شود. ب) طول مسیر پیموده شده توسط یک وسیله نقلیه، در دیاگرام بازسازی‌شده حاصل از مشاهدات با

خطای تصادفی، به‌تدریج بیشتر از طول مسیر واقعی پیموده شده توسط یک خودرو می‌شود. این مسئله موجب ایجاد یک انحراف در خط سیر وسیله نقلیه نسبت به حالت واقعی می‌شود (خطای سیستماتیک).

بنابراین هدف روش‌های هموارسازی داده، بایستی حذف خطاهای سیستماتیک و تصادفی از مشاهدات گسسته موجود باشد. هر ۲ خطا بر روی نتایج تحقیق انجام‌شده با استفاده از داده‌های پروژه NGSIM مؤثر خواهد بود.

تاکنون روش‌های مختلفی برای هموارسازی داده‌ها توسعه یافته است؛ که مهم‌ترین آنها عبارت‌اند از: moving average filtering، Lowess and loess و Savitzky-Golay filtering در تمامی این روش‌ها، خطای تصادفی داده‌ها از بین می‌رود، درحالی‌که خطای سیستماتیک همچنان باقی می‌ماند. همان‌طور که در شکل ۱۱ دیده می‌شود، طول مسیر مشاهده‌ای، طی شده توسط خودرو عقبی بیشتر از طول واقعی آن است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، علی‌رغم هموارسازی داده‌ها خطای سیستماتیک با انحراف در مسیر حرکت مشاهده‌ای خودرو عقبی نسبت به مسیر واقعی طی شده توسط آن قابل‌ملاحظه است، درحالی‌که با هموارسازی داده‌ها خطای اتفاقی یا نویز داده‌ها در خط سیر مشاهده‌شده کاملاً از بین رفته است. در این تحقیق تنها خطای اتفاقی داده‌های آزادراه I-80 از بین برده می‌شود و از خطای سیستماتیک صرف‌نظر می‌شود.



شکل ۱۱. خط سیر مشاهده‌شده، واقعی و هموارشده خودروهای عقبی و جلویی در فرآیند تعقیب

یکی از مهم‌ترین روش‌های هموارسازی داده‌ها، متوسط‌گیری است. در این روش ابتدا بایستی یک عدد به‌عنوان دهانه جهت انجام محاسبات تعریف شود. دهانه محدوده‌ای از نقاط مجاور نقطه موردنظر است که از آن برای انجام متوسط‌گیری استفاده می‌شود. طول این دهانه می‌تواند در محاسبات مختلف متغیر باشد. دهانه بزرگ داده‌ها را بیشتر هموار می‌کند اما میزان دقت آنها را کاهش می‌دهد اما یک دهانه کوچک برعکس دقت بیشتری داشته ولی خطای بیشتری وجود خواهد داشت. برای هموارسازی داده‌های مربوط به مختصات طولی خودروها، در این تحقیق نیز از روش متوسط‌گیری استفاده شده است. برای این منظور در نرم‌افزار MATLAB داده‌های مربوط به موقعیت مکانی تمامی وسایل نقلیه با دهانه ۵ هموار شده است. سپس بر مبنای این داده‌های هموارشده، مقادیر سرعت و شتاب وسائل‌نقلیه مجدداً محاسبه شده است.

برای حل مسئله مکان‌یابی شناسگر در آزادراه I-80 از الگوریتم ژنتیک استفاده شد. کد نویسی این الگوریتم با توضیحاتی که در

بخش سوم، روش‌شناسی تحقیق، آمد، در نرم‌افزار متلب صورت گرفت. همان‌طور که ذکر شد تابع هدف اختلاف‌زمان سفر واقعی وسایل نقلیه با زمان سفر برآورد شده از شناسگرها است. زمان سفر برآورد شده از شناسگرها خود تابعی از محل شناسگر است.

پارامترهای الگوریتم ژنتیک با چندین ده بار سعی و خطا به‌صورت جدول ۲ انتخاب شد. سهم عملگرهای ترکیب متقابل، جهش و نخبه‌گرایی نشان‌دهنده چگونگی ایجاد اعضای هر نسل از نسل قبلی است. در خصوص عملگرهای ترکیب متقابل و جهش در فصل سوم توضیح کافی داده شده است. عملگر نخبه‌گرایی که بهترین‌های هر نسل را بدون تغییر در نسل بعدی کپی می‌کند. این کار باقی ماندن (از بین نرفتن) بهترین اعضا در طول نسل‌ها را تضمین می‌کند.

جدول ۲. پارامترهای الگوریتم ژنتیک

۱	تعداد نسل‌ها	٤۰۰
۲	تعداد اعضای هر نسل	۱۰۰
۳	سهم ترکیب متقابل	٦۰ درصد
٤	سهم جهش	۲۰ درصد
٥	سهم نخبه‌گرایی	۲۰ درصد

نتایج حاصل از اجرای کد نرم‌افزار متلب برای حل مسئله مکان‌یابی شناسگر با الگوریتم ژنتیک در جدول ۳ ارائه می‌شود. همان‌طور که در جدول مشخص است و انتظار نیز می‌رفت، با افزایش تعداد شناسگرها مقدار تابع هدف که همان اختلاف زمان سفر است کم و کمتر می‌شود.

جدول ۳. نتایج حل مسئله مکان‌یابی شناسگر

تعداد شناسگر	مقدار تابع هدف (veh.dsec*E-6)	محل شناسگر از ابتدای آزادراه تحت بررسی (فوت)
۱	۰/۲٤۳۱۹۷	٦٥۰
۲	۰/۲٤٦۷۱۰	۹٦٥ ،٥۱۰
۳	۰/۱۸۷۳۲۳	۱۱٤٥ ،۷۱٦ ،۳٥۷
٤	۰/۱۷۳٤۳٤	۱۳٤۹ ،۸٥۹ ،٥٥۷ ،۲۹۸
٥	۰/۱٤٥۹۲۱	۱۳٥۷ ،۱۰۰۹ ،۷۲٦ ،٥۰۸ ،۲٥۲
٦	۰/۱۲۷٤۳۷	۱۳۰٦ ،۱۱٥٦ ،۸۹۷ ،۷۲۱ ،٤۳٤ ،۲۱۱
۷	۰/۱۱۰۹۲۳	۱٤۰۹ ،۱۱۹٤ ،۹۹٦ ،۷۰٦ ،٥٥۹ ،۳۸٥ ،۱۹۰
۸	۰/۰٦٤٥٤۷	۱۲٦۸ ،۹۳۳ ،۸٦٤ ،۷۳۲ ،٥۳۹ ،٤۰۷ ،۲۹٥ ،۱٦۸
۹	۰/۰۲٦۱۷۱	۱٤٥۳ ،۱۲۷۹ ،۱۱۲۷ ،۹٤٦ ،۷۸۰ ،٦۳۹ ،٤۹۷ ،۳۲۹ ،۱٦۲
۱۰		۱٤٦۹ ،۱۳۲۰ ،۱۱٥۰ ،۱۰۰۱ ،۸۳۹ ،۷٥۱ ،٥٥۷ ،٤۳٤ ،۳۰۲ ،۱٥۳

٤. نتیجه‌گیری

یک ایستگاه نظارت بر ترافیک شامل مجموعه‌ای از شناسگرهای حلقه‌ای است که مسیرهای جاده‌ای را تحت پوشش قرار می‌دهند. شناسگرهای حلقه‌ای شرایط ترافیکی را در موقعیت‌های مشخصی که در آن قرار دارند، مورد نظارت قرار می‌دهند. این دستگاه‌ها اطلاعاتی را در مورد جریان ترافیک و عملکرد راه‌های جاده‌ای جمع‌آوری می‌کنند و به افراد شاغل در این بخش اجازه و امکان نظارت بر شرایط حاضر در آزادراه‌ها را می‌دهند. این دستگاه‌ها اطلاعاتی در مورد شرایط ترافیکی مانند تعداد وسایل نقلیه موجود، جریان و سرعت آن‌ها را ارائه می‌دهند. اطلاعات جمع‌آوری‌شده سپس به بخش‌های مخصوص به خود می‌روند و کاربران حاضر نیز در مواقع لازم کارهای خود را انجام خواهند داد. این اطلاعات هم‌چنین ممکن است برای ارزیابی عملکرد و یا تحلیل، ذخیره شوند. ارزیابی عملکرد آزادراه‌ها بر اساس اطلاعات به‌دست‌آمده از شناسگرهای حلقه‌ای انجام می‌شود. سرعت‌هایی که این دستگاه‌ها از آزادراه ارائه می‌دهند، برای شناسایی اتفاقات و نظارت بر شاخص‌های ترافیکی مانند تعداد، مدت و زمان سفر مفید هستند. معیارهای عملکرد محاسبه‌شده از سرعت نیز باعث بهبود عملکرد بزرگراه‌ها از طریق میزان چگالی می‌شود. این دو شاخص در نظارت بر فعالیت آزادراه‌ها کمک شایانی می‌کنند. برنامه‌های سامانه هوشمند حمل‌ونقل نیز مانند سامانه‌های جمع‌آوری اطلاعات مسافران یا شناسایی اتفاقات درون آزادراه‌ها اغلب سرعت را به‌عنوان یک پارامتر ورودی اولیه در نظر می‌گیرند. به‌طورکلی، سرعت‌های ثبت‌شده توسط شناسگرهای حلقه‌ای جهت بهره‌وری و کارآمدی و تأثیرگذاری هر چه بیش‌تر سامانه‌های مدیریت حمل‌ونقل آزادراهی، بسیار حیاتی هستند.

در این تحقیق، مکان شناسگر در طول مسیر آزادراه به‌گونه‌ای تعیین شد که زمان سفر پیش‌بینی‌شده توسط شناسگر کم‌ترین خطا را داشته باشد. زمان سفر واقعی خودروها از داده‌های خط سیر واقعی خودروها به دست آمد. برای تخمین زمان سفر وسایل نقلیه با استفاده شناسگر، ابتدا برای بازه زمانی تحلیل، متوسط سرعت وسایل نقلیه را به دست آوردیم و سپس با در اختیار داشتن طول ناحیه تحت پوشش شناسگر و سرعت (با فرض حرکت با سرعت ثابت وسایل نقلیه در طول ناحیه پوشش شناسگر) تخمینی از زمان سفر وسایل نقلیه محاسبه گردید. به نظر می‌رسد روش‌شناسی ارائه‌شده برای تعیین محل بهینه شناسگر به‌ویژه در کریدورهای طویل بسیار سودمند است. یکی از جنبه‌های کاربردی این تحقیق ارائه و توسعه روش‌های بهینه‌سازی شناسگرهای مورداستفاده در سامانه‌های هوشمند حمل‌ونقل به‌منظور مدیریت زیرساخت موجود به‌صورت روشی سودمند جهت ارائه راه‌کارهای پیشرفته کنترل و مدیریت ترافیک است.

تعریف متفاوت عملگرهای جهش و به‌ویژه ترکیب متقابل در الگوریتم ژنتیک برای مسئله مکان‌یابی شناسگرها می‌تواند موضوع برخی تحقیقات آتی باشد. در این تحقیق، هیچ‌گونه بهینه‌سازی در خصوص پارامترهای الگوریتم ژنتیک شامل تعداد اعضای هر نسل و تعداد پیشرفت نسل‌ها، احتمال جهش و ترکیب متقابل صورت نگرفت و تنها بر اساس چندین بار سعی و خطا مقادیر مناسب اختیار شد. این مورد می‌تواند موردبررسی قرار بگیرد. سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی مثل بازپخت شبیه‌سازی‌شده و کلونی مورچه می‌تواند جهت ارزیابی کارایی روش‌های بهینه یابی جستجویی موردبررسی قرار بگیرد.

٥. پی‌نوشت‌ها

1. Next Generation Simulation (NGSIM)
2. Federal Highway Administration (FHWA)
3. Fitness Function
4. Crossover Rate
5. Mutation Rate

٦. مراجع

- National Transportation Statistics, Bureau of Transportation Statistics, U. S. Department of Transportation, Washington, D. C, 2007.
- Bremmer, D., K. Cotton, D. Cotey, and C. Prestrud. Measuring congestion: learning from operational data. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1895, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D. C., 2004, pp. 186-196.
- Massey, A., G. W. Saylor, H. W. Wood, B. Baur, and E. Hauser. Summary of ITS best management practices and technologies for the state of Ohio. In Proceedings of ASCE Conference, October 2001, pp. 127-134.
- Safirova, E., K. Gillingham, W. Harrington, and P. Nelson. Are HOT Lanes a HOT Deal? The Potential Consequences of Converting HOV to HOT Lanes in Northern Virginia. Urban Complexities Issue Brief, Washington, D. C., Resources for the Future, 2003.
- Fielding, G. J., and D. B. Klein. High Occupancy/Toll Lanes: Phasing in Congestion Pricing a Lane at a Time. Policy study 170. Los Angeles: Reason Foundation, November 1993.
- Ungemah, D., and M. Swisher. So You Want To Make a High-Occupancy Toll Lane? Project Manager‟s Guide for Conversion from High-Occupancy Vehicle Lane to High-Occupancy Toll Lane. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1960, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D. C., 2006, pp. 94-98.
- Appiah, J., and M. W. Burris. QuickRide User Response to Different HOT Lane Operating Scenarios. Presented at 84th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D. C., 2005.
- Halvorson, R., M. Nookala, and K. R. Buckeye. High-Occupancy Toll Lane Innovations: I-394 MnPASS. Presented at 85th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D. C., 2006. 130
- Mowday, M. Equity and High-Occupancy Toll Lanes: Literature Review and Minnesota‟s Perceptions About I-394 High Occupancy Toll Lanes. Presented at 85th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D. C., 2006.
- Frank D., J. Zmud and T. Patterson. Pricing Comes to Minnesota: Attitudinal Evaluation of I-394 HOT Lane Project. Presented at 85th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D. C., 2006.
- Zhang, G., Y. Wang, H. Wei, and P. A. Yi. Feedback-Based Dynamic Tolling Algorithm for High-Occupancy Toll Lane Operations. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2065 Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D. C., 2008, pp. 54-63.
- Jain, M., and B. Coifman. Improved Speed Estimates from Freeway Traffic Detectors. ASCE Journal of Transportation Engineering, Vol. 131, No. 7, 2005, pp. 483-495.
- Garry F. L. Travel Time Estimation on Freeways Using Loop Detectors and AVI Technologies. Compendium: Graduate Student Papers on Advanced Surface Transportation Systems, Southwest Region University Transportation Center, Texas Transportation Institute, Texas A&M University System, College Station, TX. 1998, pp. 115-152.
- Smith, B. L., R. B. Holt, and B. Park. Travel time estimation for urban freeway performance measurement: understanding and improving upon the extrapolation method. Presented at 83rd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D. C., 2004.
- Turner, S. M., S. M. Eisele, R. J. Benz, and D. J. Holdener. Travel time data collection handbook. Report No. FHWA-PL-98-035, Texas Transportation Institute, Texas A&M Univ., College Station, Texas, 1998.
- Li, R., G. Rose, and M. Sarvi. Evaluation of speed-based travel time estimation models.

Research Board, No. 1719, Transportation Board of National Academics, Washington, D. C., 2000, pp. 85-93.
- Park, D., S. You, J. Rho, H. Cho, and K. Lee. Investigating Optimal Aggregation Interval Sizes of Loop Detector Data for Freeway Travel-Time Estimation and Prediction. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 36, 2009, pp. 580-591.
- Oh, C., S. G. Ritchie, and J. Oh. Exploring the Relationship between Data Aggregation and Predictability to provide Better Predictive Traffic Information. In Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, No. 1935, Transportation Board of National Academics, Washington, D. C., 2005, pp. 28-36.
- Bar-Gera, H. Evaluation of a cellular phone-based system for measurements of traffic speeds and travel times: A case study from Israel. In Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, No. 2056, Transportation Board of National Academics, Washington, D. C., 2007, pp. 380-391. 132
- Martin, P. T., A. Stevanovic, I. Vladisavljevic, and D. Jovanovic. VISUM-Online (OTACHAT). Report No. UTL-1106-90. University of Utah Traffic Laboratory, Salt Lake City, Utah, January 2007.
- Martin, P. T., I. Vladisavljevic, and D. Yusufzyanova. The I-15 Express Lanes Evaluation. Report No. UTL – 1106 – 89 (v9). University of Utah Traffic Laboratory, Salt Lake City, Utah, November 2007.
- Brydia, R. E., S. M. Turner, W. L. Eisele, and J. C. Liu. (1998) „Development of Intelligent Transportation System Data Management", In Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, No. 1625, Transportation Board of National Academics, Washington, D. C., 1998, pp. 124-130.
- Turner, S. M., W. L. Eisele, B. J. Gajewski, L. P. Albert, and R. J. Benz. ITS Data Archiving: Case Study Analyses of San Antonio TransGuide Data. Publication FHWA-Journal of Transportation Engineering, Vol. 132, No. 5, 2006, pp. 540- 547.
- Nanthawichit, C., T. Nakatsuji, and H. Suzuki. Application of Probe-Vehicle Data for Real-Time Traffic-State Estimation and Short-Term Travel-Time Prediction on a Freeway. In Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, No. 1855, Transportation Board of National Academics, Washington, D. C., 2003, pp. 49-59.
- Westerman, M., R. Litjens, and J. Linnartz. Integration of Probe Vehicle and Induction Loop Data Estimation of Travel Times and Automatic Incident Detection. 131 Publication UCB-ITS-PRR-96-13. California Partners for Advanced Transit and Highways (PATH), University of California, Berkeley, 1996.
- Bloomberg, L. D., V. W. Bacon, and A. D. May. Freeway Detector Data Analysis for Simulation of The Santa Monica Freeway - Initial Investigations. Publication UCB-ITS-PWP-93-1, California Partners for Advanced Transit and Highways (PATH), University of California, Berkeley, 1993.
- El-Geneidy, A. M., and R. L. Bertini. Toward Validation of Freeway Loop Detector Speed Measurements Using Transit Probe Data. IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC, Proceedings - 7th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 2004, pp. 779-784.
- Tong, D., B. Coifman, and C. J. Merry. Traffic Information Deriving Using GPS Probe Vehicle Data Integrated with GIS. GIS for Transportation Symposium, 2006, pp. 1-23.
- Berka, S., and B. K. Lall. New perspectives for ATMS: advance technologies in traffic detection. Journal of Transportation Engineering, Vol. 124, no. 1, 1998, pp. 9-15.
- Gajowski, B. J., S. M. Turner, W. L. Eiscle, and C. H. Spiegclman. Intelligent Transportation System Data Archiving: Statistical Techniques for Determining Optimal Aggregation Widths for Inductive Loop Detector Speed Data. In Transportation Research Record: Journal of Transportation

PL-99-024, Texas Transportation Institute, Texas A&M University.
- Margiotta, R., ITS as a Data Resource: Preliminary Requirements for a User Service. Publication FHWA-PL-98-031, FHWA, U. S. Department of Transportation, 1998.
- Haigwood, J. UDOT email correspondence, 2011, Appendix A.
- Blackwelder, G. UDOT email correspondence, 2010, Appendix B. 34. Bremmer, D., K. Cotton, D. Cotey, and C. Prestrud, "Measuring congestion: learning from operational data," In Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, No. 1895, Transportation Board of National Academics, Washington, D. C., 2004, pp. 186-196.